

# НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 621.74

## МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛОВЕДЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

Колокольцев В.М., Петроченко Е.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

**Аннотация.** В статье приведен анализ научно-исследовательских работ в области получения отливок из белых легированных чугунов с требуемым комплексом механических, физико-механических и специальных свойств. Показано, что работы, как правило, направлены на разработку технологий управления процессами формирования необходимой макро- и микроструктуры сплавов через выбор оптимального состава, подготовку расплава к заливке в формы (выплавка, рафинирование, модифицирование, температура заливки, высокотемпературная обработка расплава), скорость кристаллизации при формировании первичной литой структуры и вторичной фазовой перекристаллизации при термической обработке.

**Ключевые слова:** белые чугуны, легирующий комплекс, скорость охлаждения, модифицирование, рафинирование, термовременная обработка расплава, термическая обработка, структура, механические свойства, износостойкость, жаростойкость.

### Введение

Основным массовым процессом изготовления изделий, без которых не может обойтись современная промышленность, является чугунное литье. Литье из чугуна охватило все области металлургии, машиностроения, строительства, автомобилестроения, электрооборудования.

Надежность машин, механизмов и конструкций в значительной степени зависят от качества и функциональных свойств отливок. Технология изготовления литых изделий разрабатывается исходя из определенных требований к качеству.

Белые легированные чугуны широко используют как материал для инструмента и деталей машин и механизмов, подвергающихся интенсивному изнашиванию и окислению. Современные белые чугуны – сложнелегированные многокомпонентные сплавы, различные по структуре и специальным свойствам. Они представляют собой отдельную группу промышленных чугунов, при затвердевании которых формируется композиционная структура. Именно она определяет специфические свойства белых чугунов в литом состоянии.

Несмотря на обилие литературных данных [1–15], до сих пор актуальны исследования по изучению влияния легирующих элементов и условий охлаждения на процессы кристаллизации и структурообразования, механические и эксплуатационные (жаростойкость, износостойкость, коррозионностойкость и др.) свойства этих чугунов. Особен-

но это касается условий формирования различных эвтектик и карбидной фазы, металлической матрицы при наличии в составе чугуна нескольких легирующих элементов и модификаторов.

В многочисленных работах [6, 8, 16–25, 83] показано, что для производства литых изделий из белых чугунов с повышенными функциональными свойствами необходимо обеспечить комплекс мероприятий, к которым относятся подготовка шихтовых материалов и качественного расплава, обработка его рафинирующе-модифицирующими материалами, выбор легирующего комплекса, термовременная обработка расплава. На формирование структуры литых изделий (параметры карбидной фазы и металлической основы чугунов) влияют условия охлаждения при затвердевании и последующая термическая обработка.

### 1. Металлургические аспекты производства литых изделий из белых чугунов

Свойства литых изделий из легированных белых чугунов определяются структурой металлической матрицы и карбидной фазой. Отрицательное влияние на свойства оказывает наличие в структуре первичных карбидов. В работах [1, 22, 26–32] установлено, что одним из источников первичных заэвтектических карбидов в хромистых чугунах является высокоуглеродистый феррохром, используемый для выплавки высокохромистых чугунов. Поступающие в расплав из такой шихты крупные карбиды хрома не успевают пол-

ностью раствориться в процессе плавки чугуна и остаются в структуре после затвердевания сплава. Исследования влияния различных марок феррохрома на структуру и износостойкость высокоуглеродистого чугуна показали целесообразность использования при выплавке высокохромистых чугунов низкоуглеродистых марок феррохрома. Свойства такого чугуна выше по сравнению с чугуном, выплавленным на феррохроме с более высоким содержанием углерода.

На микрофотографиях (рис. 1) хорошо видно различие в строении и форме карбидной фазы (особенно заэвтектических первичных карбидов) у чугунов, выплавленных с применением только высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ800, низкоуглеродистого марки ФХ025 и феррохрома двух марок ФХ800 и ФХ025.

Для улучшения структуры и свойств отливок авторами рекомендованы термовременные режимы обработки расплава при использовании в шихте для плавки различных марок феррохрома.

Немаловажным фактором в формировании структуры и свойств отливок является температура заливки чугуна в формы. В работах [22, 26] определены рациональные температурные интервалы заливки чугуна в формы, позволяющие предотвратить появление зоны столбчатых кристаллитов, нежелательной морфологии карбидов, образованию пригара, в ряде случаев трудноудаляемого, и трещин.

Скорость охлаждения – наиболее существенный фактор, определяющий характеристики первичной литой структуры белых износостойких чугунов. Определяя переохлаждение, при котором начинается кристаллизация, скорость охлаждения отливки меняет кристаллизационные параметры – скорость образования центров и линейную скорость роста кристаллов. Скорость охлаждения отливки определяется главным образом приведенной толщиной отливки, типом литейной формы, температурой заливки и неодинакова на поверхности и в центре отливки, особенно массивной. Номенклатура отливок из износостойких высокохромистых чугунов по

массе и толщине стенок достаточно широка. Соответственно широк и диапазон скоростей охлаждения реальных отливок в интервале кристаллизации. По данным [6, 33–35] он составляет 0,5–200°С/мин. Вследствие этого могут существенно меняться структура и свойства одного и того же состава чугуна при изготовлении из него отливок различных конфигураций, массы, толщины стенки. Знание характера изменения этих свойств позволяет управлять конечной литой структурой сплавов и прогнозировать их свойства.

В работах [22, 26] изучено влияние толщины стенки отливок из чугунов различных марок, залитых в песчано-глинистые формы и чугунные кокили.

Показано, что увеличение толщины стенки отливки (снижение скорости охлаждения) приводит не только к укрупнению карбидов, но и к увеличению дендритов первичного аустенита и расстояния между карбидами в эвтектике. Это снижает свойства чугунов.

При анализе изменения свойств в зависимости от скорости охлаждения было установлено, что для небольших толщин отливок (до 30 мм) разница в свойствах и структуре невелика как для песчано-глинистых форм, так и для кокиля. При толщине отливки 10 мм и в том, и другом случае структура представляет собой мартенситную или мартенситно-трооститную матрицу с дисперсными карбидами  $M_7C_3$  и  $MC$ . Увеличение толщины стенки приводит к снижению скорости охлаждения отливки и изменению строения металлической матрицы и карбидов, что особенно характерно при литье в песчано-глинистые формы. В структуре появляется остаточный аустенит, и его доля тем больше, чем массивнее отливка. Укрупняются, причем резко при толщине стенки 50 и более миллиметров, карбиды, переходя в веерообразную форму. Образуются участки оголенной матрицы. Износостойкость снижается. Рельеф поверхности износа – неравномерный, с рисками различной глубины, длины, ширины и ямками вследствие выкрашивания крупных карбидов.

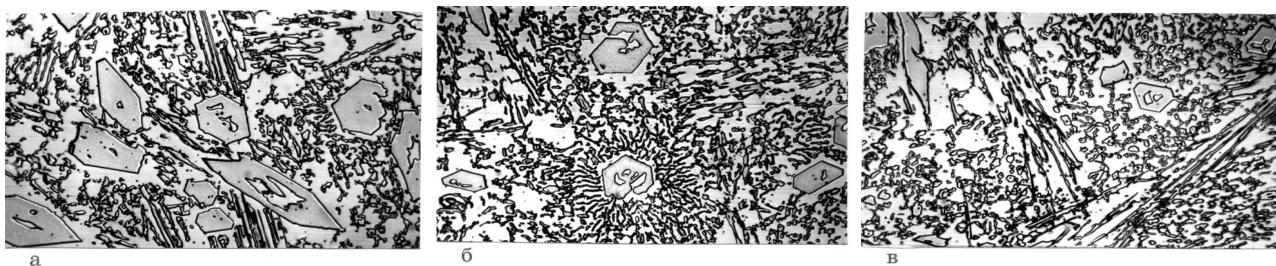


Рис. 1. Микроструктура чугуна ИЧ280Х25ГНД, выплавленного с применением феррохрома различных марок: а – ФХ800; б – ФХ800 + ФХ025; в – ФХ025

Кроме этого, для отливок с толщиной стенки более 50 мм характерно существенное различие в дисперсности литой структуры на поверхности и в центре, где структура более грубая. Но это менее заметно сказывается на износостойкости, так как интенсивному износу подвергаются поверхностные слои отливок.

Таким образом, обобщив полученные данные, авторы отметили, что влияние скорости охлаждения на абразивную износостойкость исследованных чугунов проявляется в основном через дисперсность литой структуры и возможность получения закалочных структур непосредственно после литья. Это оказалось возможным в результате правильно выбранного химического состава сплавов, в котором эффективно использованы возможности каждого из легирующих элементов для формирования необходимой структуры.

В работах [3, 4, 10, 20, 22, 23, 36–46] показано, что наибольшего повышения функциональных свойств литых изделий можно добиться путем комплексного модифицирования расплава активными элементами, причем желательно, чтобы они имели различный механизм воздействия на расплав, т.е. были инокуляторами, ингибиторами и инверсорами.

Зависимость жароизносостойкости чугунов от количества вводимых кальций-стронциевого карбоната, силикокальция, ферробора и лигатуры БФТ-1 носит ярко выраженный экстремальный характер с максимумом при строго определенном количестве вводимой добавки. Количество вводимого карбоната, при котором жароизносостойкость чугунов максимальна: для ИЧ220Х18Г4НТ и ИЧ270Х24НТБР составляет 5 кг/т, для ИЧХ28Н2 – 6 кг/т. Количество вводимого бора для ИЧ220Х18Г4НТ составляет 0,02%, для ИЧХ28Н2 0,01%. Максимальные показатели свойств чугуна ИЧ220Х18Г4НТ при добавлении силикокальция СК20 соответствуют количеству добавки 6,6 кг/т. Количество БФТ-1, при котором свойства ИЧХ28Н2 наибольшие, составляет 5 кг/т.

Обработка расплава чугуна ИЧХ28Н2 одновременно (Ca,Sr)CO<sub>3</sub> и БФТ-1 в количествах 3 и 4 кг/т соответственно существенно улучшает жаростойкость и износостойкость, чем при раздельном их использовании.

Термовременная обработка способствует измельчению карбидов, что приводит к повышению абразивной и ударно-абразивной износостойкости чугунов, при незначительном понижении жаростойкости. Одновременному повышению всех специальных свойств ТВО не способствует.

Установлено [41, 42] взаимное влияние теплоаккумулирующей способности формы и температуры выдержки расплава при ТВО на структуру и свойства чугуна. С повышением теплоаккумулирующей способности формы повышается

степень влияния температуры выдержки. Наибольшее влияние температура выдержки оказывает на расплавы, залитые в кокиль, где происходит значительное увеличение доли карбидов площадью менее 10 мкм<sup>2</sup> и уменьшение доли крупных карбидов площадью более 20 мкм<sup>2</sup>.

Совместное влияние ТВО и (Ca,Sr)CO<sub>3</sub> с БФТ-1 на расплав ИЧХ28Н2 обеспечило повышение всех показателей свойств. Наибольший показатель абразивной износостойкости соответствует температуре выдержки чугуна при 1470°C, а ударно-абразивной – при температуре 1420°C. Причем показатели ударно-абразивной износостойкости снизились по сравнению с показателями, полученными при воздействии на чугун только ТВО. Жаростойкость также повысилась, и наибольшим показателям окислительности и ростостойчивости образцов соответствуют температуры выдержки расплава 1420–1470°C.

Применение ТВО и разработанного комплекса ((Ca,Sr)CO<sub>3</sub> и БФТ-1) как раздельно, так и совместно улучшает комплекс литейных свойств чугунов: увеличивает жидкотекучесть, снижает линейную (свободную и затрудненную) усадку и замедляет интенсивность развития усадки в начальный момент; повышает трещиностойкость чугуна.

## 2. Металловедческие основы повышения эксплуатационных свойств литых изделий из КЛБЧ

Получение чугуна с соответствующим комплексом механических и специальных свойств заключается в правильном выборе его химического состава. Для выбора содержания углерода и легирующего комплекса необходимо знать влияние как отдельного элемента, так и совместное с другими элементами на формирование структуры и свойств отливок в различных условиях охлаждения при затвердевании и термической обработке.

Одним из важнейших факторов, определяющих сопротивление отливок из белых легированных чугунов изнашиванию, агрессивным средам и высоким температурам, является их структурное состояние. Для различных видов эксплуатации оптимальные функциональные свойства создаются при различных, но характерных для каждого случая, структурных состояниях сплавов [1–3, 5–8, 19, 24, 34,35].

Авторами [4, 10, 22, 23, 36, 37, 47, 48] установлены закономерности влияния химического состава, температурных режимов охлаждения металла в литейной форме на структуру металлической основы, карбидной фазы, морфологию, химический состав эвтектических композиций, механические свойства, износостойкость и жаростойкость КЛБЧ различных систем легирования.

По результатам исследования химического и

фазового состава, скорости охлаждения определены виды эвтектик (двойная аустенитно-ванадиево-карбидная ( $\gamma + VC$ ) и тройная ледебуритоподобная ( $\gamma + Fe_3C + VC$ )) и основные типы структур, формирующиеся в сплавах системы Fe-V-C: структура, состоящая из дендритов аустенита (или продуктов его распада) и тройной эвтектики  $\gamma + Fe_3C + VC$  (рис. 2, а, б); полностью инвертированная структура эвтектики  $\gamma + VC$  (рис. 2, г, д); структура, состоящая из двух эвтектик  $\gamma + VC$  и  $\gamma + Fe_3C + VC$  (рис. 2, в, е). Установлены составы сплавов (7% V и 2,0–2,5% C), обеспечивающие образование композиционной полностью инвертированной структуры ванадиевых чугунов при охлаждении в сухой ПГФ. При увеличении скорости охлаждения (литье в кокиль) при одном и том же составе сплава количество ледебурита уменьшается, также происходит снижение критической концентрации ванадия при сохранении инвертированной структуры эвтектики (от 7 до 5% V). При таком соотношении ванадия и углерода резко уменьшается количество карбидов в структуре (до 10%). В результате этого существенно снижается относительная износостойкость в различных условиях абразивного изнашивания [49–53].

Определены концентрационные интервалы (базовый состав сплава) по углероду и ванадию (2,6–3,0% C и 5,0–8,0% V), обеспечивающие максимальную износостойкость ванадиевых чугунов в различных условиях абразивного изнашивания. Одновременно достичь достаточно высокой износостойкости и полностью инвертированной структуры белых чугунов невозможно при легировании одним ванадием вследствие неполной инверсии эвтектики и формирования перлитной структуры металлической основы.

В работах [4, 10, 23, 36, 37, 54] установлено, что дополнительное легирование ванадиевых чугунов Ti, Cu, B и увеличение скорости охлаждения при затвердевании (залитка в кокиль) значительно сокращает (вплоть до исчезновения) количество ледебурита, увеличивает объемную долю карбидов VC и (Ti, V)C (в 2–3 раза). Структура металлической основы изменяется от перлитной (ПГФ) до мартенситно-аустенитной (кокиль) (рис. 3). Вследствие этого износостойкость комплексно-легированных чугунов повышается в 1,5–2,0 раза по периклазу и 2–4 раза по корунду. В зависимости от условий охлаждения в форме изменяются концентрационные интервалы C, V, Ti, Cu, B, обеспечивающие одинаковый уровень механических свойств и износостойкости.

В зависимости от химического состава в сплавах систем Fe-V-C и Fe-V-C-Cu-Ti-B формируются следующие типы структур сплавов: доэвтектическая, состоящая из дендритов аустенита (или продуктов его распада) и двойной эвтектики

$\gamma + VC$ ; полностью инвертированная структура эвтектики  $\gamma + VC$ ; структура, состоящая из двух эвтектик  $\gamma + VC$  и  $\gamma + Fe_3C + VC$ ; структура, состоящая из избыточных карбидов VC и двух эвтектик  $\gamma + VC$  и  $\gamma + Fe_3C + VC$ .

Структура металлической основы чугунов определяется химическим составом и условиями охлаждения – перлит различной дисперсности; трооститно-мартенситная; бейнитно-мартенситная и мартенситно-аустенитная. Форма избыточных карбидов VC – дендритная, «трефы» и др.

В работах [4, 10, 23, 36, 37] рассмотрено влияние химического состава и условий охлаждения при затвердевании на особенности формирования структуры и свойств чугунов с базовой композицией Fe-C-Cr-V. Авторами [23, 37, 53–64] исследованы сплавы с следующим содержанием элементов, масс. %: углерод – 2,6–3,0; ванадий – 5,0–8,0; медь – 0,8–1,2; титан – 0,3–0,6; бор – 0,01–0,05. Установлено, что фазовый состав хромованадиевых чугунов в литом состоянии представляет собой  $\alpha$ -фазу (мартенсит),  $\gamma$ -фазу (аустенит), карбид ванадия (VC), карбид хрома (Fe, Cr, V)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Сочетание этих фаз дает при кристаллизации две двойных эвтектики  $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$  (рис. 4, а),  $\gamma + VC$  (рис. 4, б) и тройную  $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$ . Существование карбидов разных форм и типов определяется составом чугуна и условиями его кристаллизации.

Состав карбидов и металлической основы временный и зависит от химического состава сплава и скорости охлаждения при затвердевании. Карбиды (Fe, Cr, V)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> содержат 26,0–48,0% железа, 41,0–52,0% хрома, 9,0–22,0% ванадия, карбид ванадия ограниченно растворяет железо (до 2,0–5,0%), несколько больше – хром (8,0–16,0%).

В зависимости от состава хромованадиевых чугунов формируются 5 типов структур сплавов (структурных классов): 1 – доэвтектическая, состоящая из избыточных дендритов аустенита (или продуктов его распада) и тройной эвтектики  $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$ ; 2 – структура, состоящая из двух эвтектик  $\gamma + VC$  (сферолитная форма) и  $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$ ; 3 – структура, состоящая из двух эвтектик  $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$  и  $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$ ; 4 – структура, состоящая из предэвтектических карбидов VC и эвтектик  $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$  и  $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$ ; 5 – структура, состоящая из избыточных карбидов VC (или карбидов (Fe, Cr, V)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) и эвтектик  $\gamma + VC$ ,  $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$ . Установлено, что различные структурные типы формируются в чугунах следующих составов, %: 1 тип – 2,6 C; 14–20 Cr; 3 V и 3,2 C; 14 Cr; 3 V; 2 тип – 2,6 C; 14 Cr; 9 V; 2,6 C; 14–20 Cr; 9 V; 3 тип – 3,2 C; 20 Cr; 3 V; 4 тип – 3,2 C; 14 Cr; V 9 и 2,9 C; 17 Cr; 6 V; 5 тип – 3,2 C; 20 Cr; V 9.

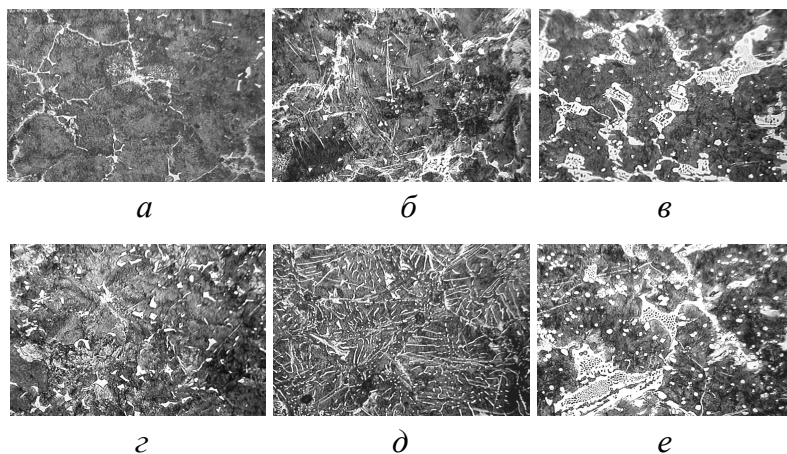


Рис. 2. Микрофотографии структур ванадиевых чугунов, x500

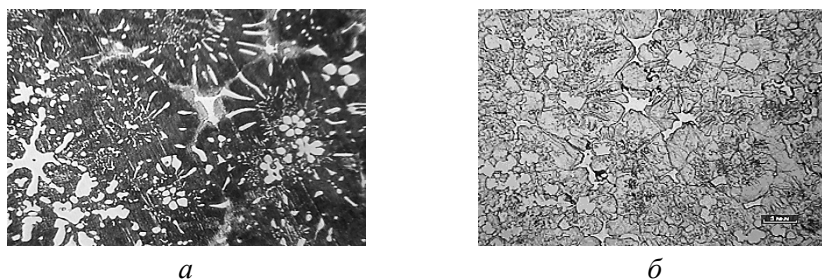


Рис. 3. Микрофотографии структур комплексно-легированных ванадиевых белых чугунов, залитых в сухую ПГФ (а) и кокиль (б), x1000

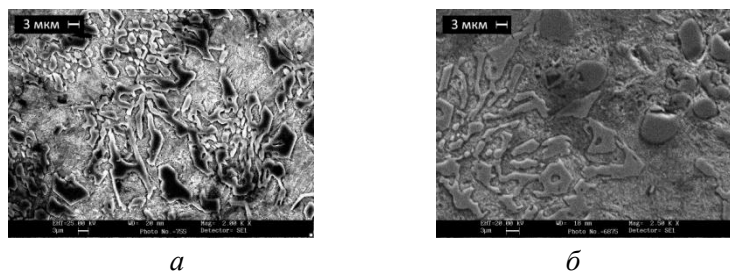


Рис. 4. Двойные эвтектики  $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$  (а) и  $\gamma + VC$  (б)

Легированные белые чугуны широко применяются для изготовления литых деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного и ударно-абразивного изнашивания при высоких температурах. На долговечность деталей существенно влияют процессы их взаимодействия с рабочей средой. Протекают процессы внутреннего и наружного окисления чугуна, необратимого увеличения объема отливки (роста). В результате роста может происходить коробление, растрескивание деталей. Возникающие растягивающие напряжения ускоряют процесс высокотемпературного окисления.

Длительное воздействие высоких температур и внешних нагрузок может привести к снижению

прочностных характеристик и износостойкости вследствие протекания необратимых структурных и фазовых превращений. Поэтому работающие в таких условиях отливки должны обладать комплексом свойств – высокими износо- и окалинотойкостью, ростоустойчивостью и жаропрочностью.

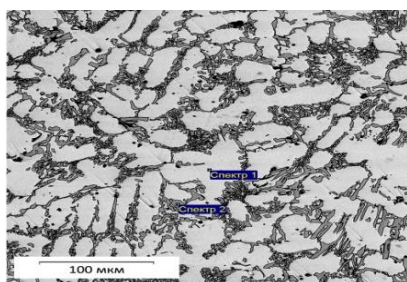
В работах [23, 47, 48, 65–81] были изучены структура сплавов и их поверхностных оксидных слоев, распределение элементов между структурными составляющими сплава и поверхности окисления, износостойкость, окалинотойкость и ростоустойчивость жароизносостойких чугунов, легированных комплексами Cr-Mn-Ni-Ti, Cr-Mn-Ni-Al-Ti, Cr-Mn-Ni-Nb-Ti, Cr-Mn-Ni-Al-Nb-Ti. Фазовый состав чугунов представляет собой  $\alpha$ -фазу (феррит),

$\gamma$ -фазу (аустенит), карбиды типа  $M_7C_3$  и карбиды типа  $MC$ . После завершения кристаллизации во всех типах форм в сплавах формируется структура, состоящая из карбидов  $TiC$  или  $(Nb, Ti)C$ , избыточных дендритов, хромистокарбидной эвтектики. В структуре чугунов, легированных Nb, присутствуют вторичные карбиды типа  $Cr_7C_3$  (рис. 5).

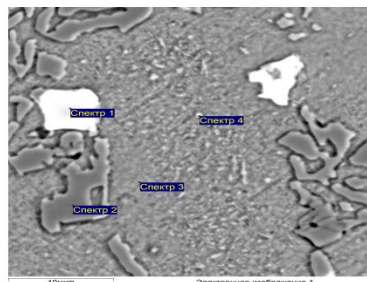
Выявлены различные типы оксидных слоев чугуна после испытаний на окислительную стойкость. Методом локального микрорентгеноспектрального анализа определили распределение химических элементов в различных участках поверхности и по глубине оксидного слоя чугуна. При содержании хрома в сплаве более 19% в оксидной пленке его концентрация более 30%, в результате на поверхности образуется плотная сплошная оксидная пленка, а глубина проникновения коррозии снижается. Определено отрицательное влияние марганца на окислительную стойкость. При повышении содержания Mn в сплаве от 3,5 до 5% происходит увеличение его концентрации в поверхности оксидной пленки от 20–30 до 35–45%, при этом снижается окислительная стойкость чугунов в 1,5–2,7 раз.

Установлены закономерности влияния первичной литой структуры на структуру, химический и фазовый состав, толщину оксидных слоев жаростойких КЛБЧ. Первичная литая структура чугунов сильно влияет на строение оксидных слоев. При этом обнаруживается эффект наследования от первичной литой структуры чугуна строения оксидных слоев; эффект наследования состава оксидной пленки в зависимости от распределения легирующих элементов в поверхностном слое литых чугунов; явление влияния частиц карбидов и эвтектики на рост оксидного слоя чугунов (рис. 6).

Выявлен эффект дисперсионного твердения сплавов в форме при совместном легировании ниобием и хромом жаростойких чугунов, что обеспечивает стабильность структуры чугунов в условиях эксплуатации при повышенных температурах. Структура чугунов состоит из карбидов  $(Nb, Ti)C$ , избыточных дендритов, эвтектики и вторичных карбидов типа  $M_7C_3$  (см. рис. 5, 6).



а



б

Рис. 5. Структура чугунов, легированных комплексами Cr-Mn-Ni-Ti (а) и Cr-Mn-Ni-Al-Nb-Ti (б)

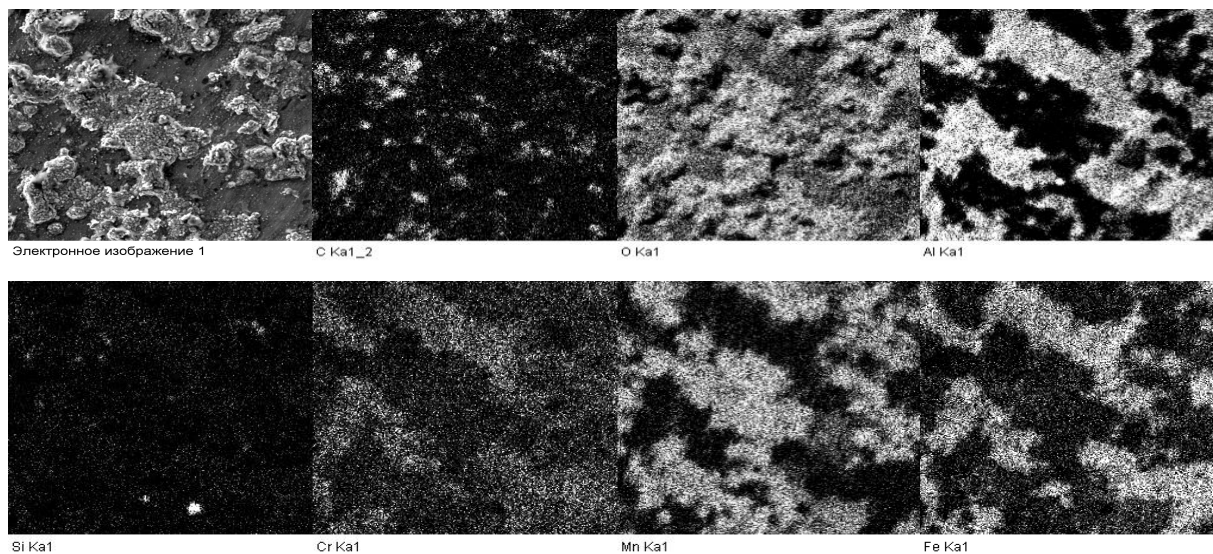


Рис. 6. Электронное изображение окисленной поверхности сплава системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Al-Ti и поэлементное картирование

Одновременному повышению износо- и жаростойкости алюминий и ниобий при раздельном легировании не способствуют. Поэтому легирование алюминием или ниобием определяется тем, какое специальное свойство превалирует при эксплуатации отливок из данных чугунов.

Результаты исследования совместного влияния алюминия и ниобия на структуру и свойства чугуна из нового состава показали положительное влияние этих элементов на структуру и весь комплекс свойств. Совместное легирование этими элементами способствует одновременному повышению жаростойкости и износостойкости.

Изучение структур сплавов исследованных систем показало, что достаточное легирование и изменение условий охлаждения при затвердевании обеспечивают формирование различных сочетаний двойных и тройных эвтектик с различным взаимным расположением металлической основы и упрочняющей фазы.

В результате анализа влияния химического состава и условий охлаждения на типы структур для каждой системы сплавов в исследуемых концентрационных интервалах авторами установлены закономерности строения избыточных фаз, эвтектических композиций и металлической основы, что позволило предложить классификацию по следующим признакам [10, 47, 48, 82]:

– **по типу металлической матрицы:** ферритные, перлитные, бейнитные, аустенитные, перлитно-ферритные, мартенситно-аустенитные, мартенситно-бейнитные, мартенситно-трооститные, мартенситно-ферритные, ферритно-аустенитные;

– по типу эвтектики:

- с эвтектикой ледебурит –  $\gamma$  + цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ );
- с эвтектикой  $\gamma$  + карбиды типа  $\text{M}_7\text{C}_3$ ;
- с эвтектикой  $\gamma$  + карбиды типа  $\text{MC}$ , например  $\text{VC}$ ;

• с эвтектикой  $\gamma$  +  $\text{M}_7\text{C}_3$  и  $\text{MC}$ , например  $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$  и  $\text{VC}$  и др.;

– по количеству эвтектик и фаз, образующих ее:

- чугуны с одной двойной эвтектикой;
- двойной и тройной эвтектиками ( $\gamma + \text{MC}$  и  $\gamma + \text{MC} + \text{M}_3\text{C}$ ;  $\gamma + \text{MC}$  и  $\gamma + \text{MC} + \text{M}_7\text{C}_3$ ,  $\gamma + \text{M}_7\text{C}_3$  и  $\gamma + \text{MC} + \text{M}_7\text{C}_3$ );

• двумя двойными и тройной эвтектиками ( $\gamma + \text{M}_3\text{C}$ ,  $\gamma + \text{M}_7\text{C}_3$ ,  $\gamma + \text{M}_7\text{C}_3 + \text{MC}$ ) и др.;

– по морфологии эвтектики:

– эвтектика  $\gamma + \text{VC}$  сферолитной формы;

– эвтектики  $\gamma + (\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$  и  $\gamma + (\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3 + \text{VC}$ , имеющие в поперечном сечении имеют форму розетки, а в продольном – веера;

– ледебуритоподобная эвтектика  $\gamma + \text{Fe}_3\text{C} + \text{VC}$ ;

– **по морфологии фаз, образующих эвтектику:**

- разветвленная (волоконистая ( $\gamma + \text{VC}$ ));
- компактная (зернистая ( $\gamma + \text{VC}$ ));
- стержневая ( $\gamma + \text{Cr}_7\text{C}_3$ )

## Заключение

Таким образом, анализ научно-исследовательских работ в области получения отливок из белых легированных чугунов с требуемым комплексом механических, физико-механических и специальных свойств показал, что все они, как правило, направлены на разработку технологий управления процессами формирования необходимой макро- и микроструктуры сплавов через выбор оптимального состава, подготовку расплава к заливке в формы (выплавка, рафинирование, модифицирование, температура заливки, высокотемпературная обработка расплава), скорость кристаллизации при формировании первичной литой структуры и вторичной фазовой перекристаллизации при термической обработке.

## Список литературы

1. Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов М.С. Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов. М.: Машиностроение, 1984. 104 с.
2. Бобро Ю.Г. Легированные чугуны. М.: Metallurgia. 1976. 288 с.
3. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Инокулирование железоуглеродистых сплавов. М.: Metallurgia, 1993. 416 с.
4. Комплексно-легированные белые чугуны функционального назначения в литом и термообработанном состояниях / Ри Э.Х., Ри Хосен, Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. и др. Владивосток: Дальнаука, 2006. 275 с.
5. Сильман Г.И. Термодинамика и термокинетика структурообразования в чугунах и сталях. М.: Машиностроение, 2007. 302 с.
6. Гарбер М.Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
7. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
8. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны – эволюция и перспективы // Литейное производство. 2000. № 9. С. 15–16.
9. Влияние структуры на свойства белых хромистых чугунов / Косицина И.И., Сагарадзе В.В., Макаров А.В. и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1996. № 4. С. 10.
10. Петроченко Е.В. Повышение эксплуатационной стойкости отливок из белых легированных чугунов за счет комплексного воздействия на их структуру: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2003. 140 с.
11. Bedolla-Jacuinde A., Aguilar S.L., and Hernandez B. Eutectic Modification in a Low-Chromium White Cast Iron by a Mixture of Titanium, Rare Earths, and Bismuth: I. Effect on Microstructure, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 14(2), 2005, pp. 149–157.
12. Neville A., Reza F., Chiovelli S., and Revega T. Characterization and Corrosion Behavior of High-Chromium White Cast Irons, Journal Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 37F, 2006, pp. 2339–2347.
13. Karantzalis A.E., Lekatou A., Kapoglou A., Mavros H., and Dracopoulos V. Phase Transformations and Microstructural Observations During Subcritical Heat Treatments of a High-Chromium Cast Iron, Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, pp. 1030–1039.
14. Sain P.K., Sharma C.P., and Bhargava A.K. Microstructure Aspects of a Newly Developed, Low Cost, Corrosion-Resistant White Cast Iron, Journal Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 44F, 2013, pp. 1665–1671.
15. Yoganandh J., Natarjan S., and Kumaresh S.P. Babu. Erosive

- Wear Behavior of Nickel-Based High Alloy White Cast Iron Under Mining Conditions Using Orthogonal Array, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 22(9), 2013, pp. 2534–2540.
16. Гольдштейн Я. Е., Гольдштейн В. А. Металлургические аспекты повышения долговечности деталей машин. Челябинск: Металл, 1995. 512 с.
  17. Трухин В.В., Печень П.В., Трухина Е.Ю. Влияние термической обработки на обрабатываемость среднехромистого износостойкого чугуна // *Вестник КузГТИ*. 2001. № 5. С. 31–34.
  18. Косилов А.А., Круглов А.А., Ребонен В.Н. Термическая обработка высокохромистого чугуна // *Литейное производство*. 2001. № 6. С. 13–14.
  19. Филипов М.А., Лхагвадорж П., Плотников Г.Н. Структурные факторы повышения износостойкости белого хромистого чугуна // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 11. С. 10–13.
  20. Емелюшин А.Н. Влияние титана и бора на износостойкость чугуна, предназначенного для механической обработки неметаллических материалов инструмента из хромистых чугунов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2000. №2. С. 28–29.
  21. Коррозионная стойкость и жаростойкость легированных белых чугунов / Ри Э.Х., Ри Хосен, Тейх В.А., Муромцева Е.В. // *Литейное производство*. 2000. №3. С. 13–17.
  22. Колокольцев В.М. Теоретические и технологические основы разработки литейных износостойких сплавов системы железо-углерод-элемент: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 1995. 427 с.
  23. Петроченко Е.В. Особенности кристаллизации, формирования структуры и свойств износостойких и жаростойких чугунов в различных условиях охлаждения: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2012. 310 с.
  24. Сорокин Г.М. Аспекты металловедения в проблеме долговечности машин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1990. № 2. С. 57–60.
  25. Асташевич Б.М. Повышение надежности железнодорожных тормозных колодок // *Литейное производство*. 1995. № 6. С. 5–6.
  26. Абразивная износостойкость литых металлов и сплавов / В.М. Колокольцев, Н.М. Мулякко, К.Н. Вдовин. Е.В. Синицкий; под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 228 с.
  27. Колокольцев В.М., Адищев В.В., Милюков С.В. Исследование износостойкости чугунов для литых бандажей дробильно-размольного оборудования // *Антифрикционные и износостойкие чугуны: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Винница, 1992*. С. 30–31.
  28. Карбидообразование в расплавах высокохромистых чугунов / О.М. Романов, Л.Я. Козлов, Л.М. Романов, Е.В. Рожкова и др. // *Литейное производство*. 1991. № 6. С. 7.
  29. Раскисление и рафинирование высокохромистого чугуна / В.А. Тейх, Ри Хосен, А.Н. Литвиненко и др. // *Литейное производство*. 1984. № 8. С. 10.
  30. Маркин И.С., Вунштейн Ф.З. Изготовление абразивостойких деталей из белых износостойких чугунов: Обзорная информация. М.: НИИинформтяжмаш, 1972. 42 с.
  31. Совершенствование режимов плавки высокохромистого чугуна и термообработки отливок из него / В.М. Колокольцев, В.Н. Аксенов, Н.Р. Забелин и др. // *Литейное производство*. 1994. № 3. С. 5–6.
  32. Термовременная обработка жидких сплавов и стали / Б.А. Баум, Г.В. Тягунов, Е.Е. Барышев и др. // *Сталь*. 1996. № 6. С. 16–20.
  33. Карпенко М.И., Марукович Е.И. Износостойкие отливки. Минск: Наука и техника, 1984. 216 с.
  34. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Металлургия, 1988. 256 с.
  35. Чугун: справ. изд. / под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова. М.: Металлургия, 1991. 576 с.
  36. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Воронков Б.Н. Комплексно-легированные белые износостойкие чугуны. Челябинск: Печатный салон «Издательство РЕКПОЛ», 2005. 178 с.
  37. Специальные чугуны. Литье, термическая обработка, механические свойства: учеб. пособие / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Соловьев В.П., Цыбров С.В.; под ред. Колокольцева В.М. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 187 с.
  38. Колокольцев В.М., Шевченко А.В. Рафинирование и модифицирование комплексно-легированных белых чугунов // *Молодежь. Наука. Будущее*. Вып. 7: сб. науч. тр. студентов / под. ред. С.В. Пыхтуновой. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 55–58.
  39. Воронков Б.В., Колокольцев В.М., Шевченко А.В. Улучшение свойств жароизносостойкого чугуна рафинированием и модифицированием // *Современная металлургия начала нового тысячелетия*: сб. науч. тр. Ч. 1. Липецк: ЛГТУ, 2007. С. 118–125.
  40. Колокольцев В.М., Шевченко А.В., Быков К.В. Рафинирование и модифицирование специальных чугунов // *Литейные процессы*. Вып. 7: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. С. 98–101.
  41. Колокольцев В.М., Гольцов А.С., Шевченко А.В. Повышение свойств чугунов специального назначения // *Литейное производство сегодня и завтра: труды 8-й Всерос. науч.-практ. конференции*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 159–162.
  42. Повышение срока службы деталей из жароизносостойких чугунов / Колокольцев В.М., Гольцов А.С., Шевченко А.В., Молочкова О.С., Воронков Б.В. // *Литейщик России*. 2009. №6. С. 9–12.
  43. Влияние микролегирования и модифицирования на свойства жароизносостойких чугунов / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Шевченко А.В., Гольцов А.С. // *Труды 9 съезда литейщиков России*. Уфа, 2009. С. 12–15.
  44. Колокольцев В.М., Шевченко А.В. Модифицирование расплава белого чугуна боридом титана // *Литейные процессы*. Вып. 9: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. С. 208–214.
  45. Повышение эксплуатационной стойкости отливок из чугуна ИЧХ28Н2 путем модифицирования его расплава комплексной лигатурой на основе титана и бора / Колокольцев В.М., Шевченко А.В., Шадохин И.М., Гольцов А.С. // *Литейщик России*. 2010. №8. С. 9–12.
  46. Колокольцев В.М., Шевченко А.В. Повышение свойств отливок из чугунов специального назначения путем рафинирования и модифицирования их расплавов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. №1. С. 23–29.
  47. Петроченко Е.В. Взаимосвязь химического состава, структуры и свойств комплексно-легированных белых чугунов в литом состоянии // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2012. № 3. С. 51–55.
  48. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V.. Structure Feature And Properties Of High-Alloy White Irons // *Vestnik Of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013. №5 (45), 2013, pp. 5–8.
  49. Петроченко Е.В. Влияние фазового состава на износостойкость отливок из белого чугуна // *Литейщик России*. 2002. № 9. С. 12–15.
  50. Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В. Повышение стойкости оснастки прессформ для прессования периклазового кирпича // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2003. №3. С.56–59.
  51. Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В. Повышение качества и эксплуатационной стойкости деталей и инструмента, работающего в условиях абразивного изнашивания // *Шлифобразив 2003: сб. статей Междунар. науч.-техн. конф. Волжский, 2003*. С. 190–192.
  52. Влияние химического состава на структуру и свойства белых ванадиевых чугунов / Петроченко Е.В., Петроченко О.С., Шекунов Е.В., Петроченко Т.С. // *Материаловедение и термическая обработка металлов: междунар. сб. науч. трудов. Магнитогорск, 2004*. С. 101–103.
  53. Петроченко Е.В. Структура и износостойкость ванадиевых чугунов // *Литейное производство сегодня и завтра: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2004*. С. 61–65.
  54. Формирование структуры и свойств ванадиевых чугунов при их затвердевании / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Еме-



- люшин А.Н., Потапов М.Г. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2005. № 4. С. 41–43.
55. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. Износостойкие железоуглерод-ванадиевые сплавы // Труды VII съезда литейщиков. Новосибирск, 2005. С. 105–106.
56. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. Особенности формирования карбидной фазы белых чугунов в различных условиях охлаждения // Материалы 3-й междунар. практ. конф. «Прогрессивные литейные технологии». М., 2005. С. 76–81.
57. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочков П.А. Комплексное воздействие на структуру белых износостойких чугунов с целью повышения эксплуатационной стойкости отливок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2004. № 4. С. 23–29.
58. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочков П.А. Структура и износостойкость хромованадиевых чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2004. №7. С. 25–28.
59. Петроченко Е.В. Взаимосвязь химического состава, структуры и свойств комплексно-легированных белых чугунов в литом состоянии // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. № 3. С. 51–55.
60. Петроченко Е.В., Валишина Т.С. Влияние химического состава, условий кристаллизации и режимов термической обработки на особенности микроструктуры, механические и специальные свойства белых хромованадиевых чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2009. № 2.
61. Петроченко Е.В. Комплексное влияние легирующих элементов и условий затвердевания на процессы структурообразования и свойства литых композиционных железоуглеродистых сплавов // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: тез. докл. 13-го Междунар. симпозиума. М.: Изд-во МАИ, 2007. С. 212–213.
62. Колокольцев В.В., Петроченко Е.В. Особенности формирования карбидной фазы белых чугунов в различных условиях охлаждения // Прогрессивные литейные технологии: материалы междунар. практ. конф. М., 2006. С. 76–81.
63. Петроченко Е.В. Структура литых композиционно упрочненных железоуглеродистых сплавов // II Международная школа «Физическое материаловедение». Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: XVIII Уральская школа металлургов-термистов. Тольятти, 2006. С. 149.
64. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. Закономерности формирования эвтектик в комплексно-легированных белых чугунах в различных условиях охлаждения при литье и термической обработке // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXI Уральской школы металлургов-термистов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 89.
65. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Миронов О.А. Влияние химического состава на формирование структуры и свойств жароизносостойких чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 3. С. 44–47.
66. Исследование структуры и свойств жароизносостойких чугунов / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Миронов О.А., Воронков Б.В. // Труды VII съезда литейщиков. Т.1. Новосибирск, 2005. С. 105–106.
67. Структура и свойства жароизносостойкого белого чугуна / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Миронов О.А., Воронков Б.В., Полетаев В.В., Сулейманов В.М. // Литейщик России. 2005. №7. С. 7–10.
68. Жароизносостойкий чугун / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Воронков Б.В., Миронов О.А., Сибгатуллин С.К. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. №3 (11). С. 35–37.
69. Петроченко Е.В. Исследование окислительной стойкости комплексно-легированных белых чугунов // Материалы всерос. науч. конф.: в 7 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. Ч. 2. С. 211–212.
70. Петроченко Е.В., Петроченко О.С. Исследование структуры и свойств комплексно-легированных чугунов // V1 Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых: сб. науч. тр. Екатеринбург, 2004. С. 38.
71. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Исследование структуры и свойств жароизносостойких чугунов // Материалы 65-й науч.-техн. конф.: сб. докл. Магнитогорск, 2007. Т. 1. С. 37–39.
72. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Анализ оксидных слоев жароизносостойких чугунов // VII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых: сб. науч. тр. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. С. 235–237.
73. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Изыскание составов жароизносостойких комплексно-легированных белых чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2009. № 8. С. 31–34.
74. Повышение срока службы деталей из жароизносостойких чугунов / Колокольцев В.М., Воронков Б.В., Гольцов А.С., Молочкова О.С. и др. // Литейщик России. 2009. № 6. С. 9–12.
75. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Разработка перспективных материалов для изготовления жароизносостойких литых изделий // Материалы XVII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. Г.А. Горшкова. Ярополец, 2011. С. 147–149.
76. Колокольцев В.М., Гольцов А.С. Синтез и внедрение новых жароизносостойких чугунов для изготовления отливок деталей специального назначения // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. Ч.1. Липецк: ЛГТУ, 2007. С. 85–89.
77. Колокольцев В.М., Гольцов А.С., Брялин М.Ф. Повышение эксплуатационных свойств отливок из жароизносостойких хромомарганцевых чугунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 4 (20). С. 22–25.
78. Петроченко Е.В., Миронов О.А., Молочкова О.С. Исследование влияния параметров карбидной фазы на механические и специальные свойства комплексно-легированных белых чугунов // Материаловедение и термическая обработка металлов: междунар. сб. науч. тр. / под ред. А.Н. Емелишина и Е.В. Петроченко. Магнитогорск ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. С. 238–242.
79. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Повышение свойств жароизносостойких чугунов дополнительным легированием ниобием // XXI Уральская школа металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов»: сб. науч. тр. Магнитогорск ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2012. С. 261–262.
80. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Анализ взаимосвязи химического состава, условий охлаждения при затвердевании с особенностями строения сплавов, окисленной поверхности и свойствами комплексно-легированных белых чугунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 4 (36). С. 50–53.
81. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Влияние химического состава, условий охлаждения при затвердевании на структуру и свойства жароизносостойких комплексно-легированных железоуглеродистых сплавов // Технология металлов. 2013. № 1. С. 10–14.
82. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. Классификация белых комплексно-легированных чугунов с учетом особенностей их структуры // Литейное производство сегодня и завтра: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2006. С. 75–79.
83. Колокольцев В.М. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. История. Развитие // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1(45). С. 5–6.

## METALLURGICAL AND PHYSICOMETALLURGICAL ASPECTS RELATED TO IMPROVEMENT OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF WHITE IRON CASTINGS

**Kolokoltsev Valery Mikhailovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Rector of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 29 84 02. E-mail: kwm@magtu.ru.

**Petrochenko Elena Vasilyevna** – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: evp3738@mail.ru.

**Abstract.** This article analyzes research on alloy white iron castings produced with a required set of mechanical, physical and mechanical and special properties. It is demonstrated that research focuses, as a rule, on development of techniques for controlling formation of a required macro- and microstructure of alloys by choosing an optimal composition, preparing melts for casting into molds (melting, refining, modification, casting temperature, high-temperature treatment of melts), and crystallization speed when forming a primary cast structure and secondary phase recrystallization during heat treatment.

**Keywords:** white cast irons, alloying complex, cooling rate, modification, refining, temperature time treatment of melts, heat treatment, structure, mechanical properties, wearability, heat resistance.

### References

- Zhukov A.A., Silman G.I., Froltsov M.S. *Iznosostoykie otlivki iz kompleksno-legirovannykh belykh chugunov* [Wear-resistant castings from complex alloyed white cast irons]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 104 p.
- Bobro Yu.G. *Legirovannyye chuguny* [Alloyed irons]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 288 p.
- Goldstein Ya.E., Mizin V.G. *Inokulirovanie zhelezouglerodistykh splavov* [Inoculation of iron-carbon alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1993, 416 p.
- Ri E.Kh., Ri Khosen, Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. et al. *Kompleksno-legirovannyye belye chuguny funktsionalnogo naznacheniya v litom i termoobrabotannom sostoyaniyakh* [As-cast and heat treated complex alloyed white cast irons of a functional application]. Vladivostok: Dalnauka, 2006, 275 p.
- Silman G.I. *Termodinamika i termokinetika strukturoobrazovaniya v chugunakh i stalyakh* [Thermodynamics and thermokinetics of structure formation in irons and steels]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 302 p.
- Garber M.E. *Iznosostoykie belye chuguny: svoystva, struktura, tekhnologiya, ekspluatatsiya* [Wear-resistant white irons: properties, structure, technology, operation]. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 280 p.
- Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokolnikov M.G. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 224 p.
- Tsylin I.I. *Wear-resistant white irons – evolution and prospects*. *Foundry*, 2000, no. 9, pp. 15–16.
- Kositsina I.I., Sagaradze V.V., Makarov A.V. et al. *Effect of the structure on properties of chromium white cast irons*. *Physical metallurgy and metal heat treatment*, 1996, no. 4, pp. 7–10.
- Petrochenko E.V. *An increase in service durability of alloyed white iron castings due to an integrated effect on their structure*. *Ph.D. dissertation*. Magnitogorsk, 2003, 140 p.
- Bedolla-Jacuinde A., Aguilar S.L., and Hernandez B. *Eutectic Modification in a Low-Chromium White Cast Iron by a Mixture of Titanium, Rare Earths, and Bismuth: I. Effect on Microstructure, Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 14(2), 2005, pp. 149–157.
- Neville A., Reza F., Chiovelli S., and Revega T. *Characterization and Corrosion Behavior of High-Chromium White Cast Irons*, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 37F, 2006, pp. 2339–2347.
- Karantzalis A.E., Lekatou A., Kapoglou A., Mavros H., and Dracopoulos V. *Phase Transformations and Microstructural Observations During Subcritical Heat Treatments of a High-Chromium Cast Iron*, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, pp. 1030–1039.
- Sain P.K., Sharma C.P., and Bhargava A.K. *Microstructure Aspects of a Newly Developed, Low Cost, Corrosion-Resistant White Cast Iron*, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44F, 2013, pp. 1665–1671.
- Yoganandh J., Natarjan S., and Kumaresh S.P. Babu. *Erosive Wear Behavior of Nickel-Based High Alloy White Cast Iron Under Mining Conditions Using Orthogonal Array*, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 22(9), 2013, pp. 2534–2540.
- Goldstein Ya.E., Goldstein V.A. *Metallurgical aspects of durability improvement of machine parts* [Metallurgicheskie aspekty povysheniya dolgovechnosti detaley mashin]. Chelyabinsk: Metall, 1995, 512 p.
- Trukhin V.V., Pechen P.V., Trukhina E.Yu. *Effect of heat treatment on working properties of medium-chromium wear-resistant cast irons*. *Vestnik of KuzSTI*, 2001, no. 5, pp. 31–34.
- Kosilov A.A., Kruglov A.A., Rebonen V.N. *Heat treatment of high-chromium cast irons*. *Foundry*, 2001, no. 6, pp. 13–14.
- Filipov M.A., Lkhagvadorzh P., Plotnikov G.N. *Structural factors of wearability improvement of chromium white cast iron*. *Physical metallurgy and metal heat treatment*, 2000, no. 11, pp. 10–13.
- Emelyushin A.N. *Effect of titanium and boron on wearability of cast iron used for mechanical treatment of non-metallic materials of chromium cast iron tools*. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2000, no. 2, pp. 28–29.
- Ri E.Kh., Ri Khosen, Teikh V.A., Muromtseva E.V. *Corrosion resistance and heat resistance of alloyed white cast irons*. *Foundry*, 2000, no. 3, pp. 13–17.
- Kolokoltsev V.M. *Theoretical and technological fundamentals of development of casting wear-resistant Fe-C-elemental system alloys*. *D.Sc. dissertation*. Magnitogorsk, 1995, 427 p.
- Petrochenko E.V. *Crystallization, formation of the structure and properties of wear-resistant and heat-resistant cast irons in different cooling conditions*. *D.Sc. dissertation*. Magnitogorsk, 2012, 310 p.
- Sorokin G.M. *Physicometallurgical aspects in an issue on lifetime of machines*. *Physical metallurgy and metal heat treatment*, 1990, no. 2, pp. 57–60.
- Astashkevich B.M. *An increase in reliability of railway brake shoes*. *Foundry*, 1995, no. 6, pp. 5–6.
- Kolokoltsev V.M., Mulyavko N.M., Vdovin K.N., Sinitsky E.V. *Abrazivnaya iznosostoykost litykh metallov i splavov* [Abrasive wear resistance of cast metals and alloys]. Ed. by Kolokoltsev V.M. Magnitogorsk: MSTU, 2004, 228 p.
- Kolokoltsev V.M., Adishchev V.V., Milyukov S.V. *Research on wear resistance of cast irons for cast bands of crushing and grinding equipment*. *Antifriktsionnye i iznosostoykie chuguny* [Anti-friction and wear-resistant cast irons: papers of the International

- Scientific and Technical Conference]. Vinnitsa, 1992, pp. 30–31.
28. Romanov O.M., Kozlov L.Ya., Romanov L.M., Rozhkova E.V. et al. Carbide forming in molten high-chromium irons. *Foundry*, 1991, no. 6, p. 7.
  29. Teykh V.A., Ri Khosen, Litvinenko A.N. et al. High-chromium cast iron deoxidation and refining. *Foundry*, 1984, no. 8, p. 10.
  30. Markin I.S., Vunstein F.Z. *Izgotovlenie abrazivostoykikh detaley iz belykh iznosostoykikh chugunov: Obzornaya informatsiya* [Manufacturing of abrasion-resistant parts from wear-resistant white cast irons: Survey information]. Moscow: NIInfarmtyazhmash, 1972, 42 p.
  31. Kolokoltsev V.M., Aksenov V.N., Zabelin N.R. et al. Improvement of modes of high-chromium iron melting and heat treatment of such castings. *Foundry*, 1994, no. 3, pp. 5–6.
  32. Baum B.A., Tyagunov G.V., Baryshev E.E. et al. Temperature time treatment of liquid alloys and steel. *Steel*, 1996, no. 6, pp. 16–20.
  33. Karpenko M.I., Marukovich E.I. *Iznosostoykie otlivki* [Wear-resistant castings]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1984, 216 p.
  34. Tsylin I.I. *Belye iznosostoykie chuguny. Struktura i svoystva* [Wear-resistant white cast irons. Structure and properties]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 256 p.
  35. *Chugun* [Cast iron: book of reference]. Ed. by Sherman A.D. and Zhukov A.A. Moscow: Metallurgiya, 1991, 576 p.
  36. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Voronkov B.N. *Kompleksnolegirovannye belye iznosostoykie chuguny* [Wear-resistant complex alloyed white cast irons]. Chelyabinsk: REKPOL, 2005, 178 p.
  37. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Soloviev V.P., Tsybrov S.V. *Spetsialnye chuguny. Lite, termicheskaya obrabotka, mekhanicheskiye svoystva* [Special cast irons. Casting, heat treatment, mechanical properties: a textbook]. Ed. by Kolokoltsev V.M. Magnitogorsk: MSTU, 2009, 187 p.
  38. Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V. Complex alloyed white cast iron refining and modification. *Molodezh. Nauka. Budushchee* [Youth. Science. Future]. Issue no. 7: collection of student research papers. Ed. by Pykhtunova S.V. Magnitogorsk: MSTU, 2007, pp. 55–58.
  39. Voronkov B.V., Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V. Improvement of heat- and wear-resistant cast iron properties by refining and modification. *Sovremennaya metallurgiya nachala novogo tysyacheletiya* [Modern metallurgy in the beginning of a new millennium: collection of research papers]. Part 1. Lipetsk: LSTU, 2007, pp. 118–125.
  40. Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V., Bykov K.V. Special cast iron refining and modification. *Liteynye protsessy* [Casting processes]. Issue no. 7: interregional collection of research papers. Magnitogorsk: MSTU, 2008, pp. 98–101.
  41. Kolokoltsev V.M., Goltsov A.S., Shevchenko A.V. Improvement of special cast iron properties. *Liteynoe proizvodstvo segodnya i zavtra* [The foundry of today and tomorrow: proceedings of the 8<sup>th</sup> All-Russian Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg: the Polytechnic University, 2010, pp. 159–162.
  42. Kolokoltsev V.M., Goltsov A.S., Shevchenko A.V., Molochkova O.S., Voronkov B.V. Increasing a life time of heat- and wear-resistant cast iron parts. *A caster of Russia*, 2009, no. 6, pp. 9–12.
  43. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Shevchenko A.V., Goltsov A.S. Effect of microalloying and modification on heat- and wear-resistant cast iron properties. *Trudy 9-go sezda liteyshchikov Rossii* [Proceedings of the 9<sup>th</sup> convention of Russian casters]. Ufa, 2009, pp. 12–15.
  44. Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V. Modification of molten white cast iron by titanium boride. *Liteynye protsessy* [Casting processes]. Issue no. 9: interregional collection of research papers. Magnitogorsk: MSTU, 2010, pp. 208–214.
  45. Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V., Shatokhin I.M., Goltsov A.S. An increase in service durability of IChKh28N2 iron castings by modification of molten iron with a complex alloy containing titanium and boron. *A caster of Russia*, 2010, no. 8, pp. 9–12.
  46. Kolokoltsev V.M., Shevchenko A.V. An increase in properties of special iron castings by refining and modification of molten iron. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 1, pp. 23–29.
  47. Petrochenko E.V. A relation between a chemical composition, structure and properties of complex alloyed white cast irons in an as-cast state. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 51–55.
  48. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Structure Feature and Properties of High-Alloy White Irons. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), 2013, pp. 5–8.
  49. Petrochenko E.V. Effect of a phase composition on wearability of white iron castings. *A caster of Russia*, 2002, no. 9, pp. 12–15.
  50. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V. An increase in durability of die attachments for molding periclase bricks. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2003, no. 3, pp. 56–59.
  51. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V. An increase in the quality and service durability of parts and tools operating in abrasive wear conditions. *Shlifabraziv 2003* [Grinding and abrasion: collection of papers of the international scientific and technical conference]. Volzhsky, 2003, pp. 190–192.
  52. Petrochenko E.V., Petrochenko O.S., Shekunov E.V., Petrochenko T.S. Effect of a chemical composition on the structure and properties of vanadium white cast irons. *Materialovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Materials science and metal heat treatment: international collection of research papers]. Magnitogorsk, 2004, pp. 101–103.
  53. Petrochenko E.V. Structure and wearability of vanadium irons. *Liteynoe proizvodstvo segodnya i zavtra* [The foundry of today and tomorrow: abstracts of the international scientific and practical conference]. Saint Petersburg, 2004, pp. 61–65.
  54. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Emelyushin A.N., Potapov M.G. Formation of the structure and properties of vanadium cast irons during their crystallization. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2005, no. 4, pp. 41–43.
  55. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Wear-resistant Fe-C-V alloys. *Trudy 7-go sezda liteyshchikov* [Papers of the 7<sup>th</sup> convention of casters]. Novosibirsk, 2005, pp. 105–106.
  56. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Formation of a carbide phase of white cast irons in different cooling conditions. *Materialy III mezhdunarodnoy prakticheskoy konferentsii "Progressivnye liteynye tekhnologii"* [Papers of the 3<sup>rd</sup> International Practical Conference "Advanced casting technologies"]. Moscow, 2005, pp. 76–81.
  57. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkov P.A. An integrated effect on the structure of wear-resistant white cast irons to increase service durability of castings. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2004, no. 4, pp. 23–29.
  58. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkov P.A. Structure and wear resistance of chromium-vanadium cast irons. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2004, no. 7, pp. 25–28.
  59. Petrochenko E.V. A relation between a chemical composition, structure and properties of complex alloyed white cast irons in an as-cast state. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 51–55.
  60. Petrochenko E.V., Valishina T.S. Effect of a chemical composition, crystallization conditions and heat treatment modes on features of a microstructure, mechanical and special properties of

- chromium-vanadium cast irons. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2009, no. 2.
61. Petrochenko E.V. An integrated effect of alloying elements and crystallization conditions on the formation of a structure and properties of cast composite iron-carbon alloys. *Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktssii i sploshnykh sred* [Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continua: abstracts of the 13<sup>th</sup> International Symposium]. Moscow: MAI, 2007, pp. 212–213.
  62. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Formation of a carbide phase of white cast irons in different cooling conditions. *Materialy mezhdunarodnoy prakticheskoy konferentsii "Progressivnye litейnye tekhnologii"* [Papers of the International Practical Conference "Advanced casting technologies"]. Moscow, 2006, pp. 76–81.
  63. Petrochenko E.V. The structure of cast iron-carbon alloys hardened on a compositional level. The 2<sup>nd</sup> school "Material physics". *Aktualnye problemy fizicheskogo metallovedeniya staley i splavov: XVIII Uralskaya shkola metallovedov-termistov* [Current problems of material physics of steels and alloys: the 18<sup>th</sup> Ural school of metallographers and heat treaters]. Tolyatti, 2006, 149 p.
  64. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Regularities of the formation of eutectics in complex alloyed white cast irons in different cooling conditions during casting and heat treatment. *Aktualnye problemy fizicheskogo metallovedeniya staley i splavov: XXI Uralskaya shkola metallovedov-termistov* [Current problems of material physics of steels and alloys: the 21<sup>st</sup> Ural school of metallographers and heat treaters]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 89 p.
  65. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Mironov O.A. Effect of a chemical composition on formation of the structure and properties of heat- and wear-resistant cast irons. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2007, no. 3, pp. 44–47.
  66. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Mironov O.A., Voronkov B.V. Study of the structure and properties of heat- and wear-resistant cast irons. *Trudy VII sezda liteishchikov* [Proceedings of the 7<sup>th</sup> convention of casters]. Vol. 1. Novosibirsk, 2005, pp. 105–106.
  67. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Mironov O.A., Voronkov B.V., Poletaev V.V., Suleimanov V.M. The structure and properties of heat- and wear-resistant white cast iron. *A caster of Russia*, 2005, no. 7, pp. 7–10.
  68. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Voronkov B.V., Mironov O.A., Sibagatullin S.K. Heat- and wear-resistant cast iron. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2005, no. 3 (11), pp. 35–37.
  69. Petrochenko E.V. Study of scale resistance of complex alloyed white cast irons. *Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii: v 7 chastyakh* [Papers of the all-Russian scientific conference: in 7 parts]. Part 2. Novosibirsk: NSTU, 2006, pp. 211–212.
  70. Petrochenko E.V., Petrochenko O.S. Study of the structure and properties of complex alloyed cast irons. *V1 Uralskaya shkola-seminar metallovedov-molodykh uchenykh* [The 6<sup>th</sup> Ural school-workshop of metallographers and young scientists: collection of research papers]. Ekaterinburg, 2004, 38 p.
  71. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Study of the structure and properties of heat- and wear-resistant cast irons. *Materialy 65-oy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Papers of the 65<sup>th</sup> scientific and technical conference: collection of reports]. Magnitogorsk, 2007, vol. 1, pp. 37–39.
  72. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Analysis of oxide layers of heat- and wear-resistant cast irons. *V11 Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya Uralskaya shkola-seminar metallovedov-molodykh uchenykh* [The 7<sup>th</sup> international science and technical Ural school-workshop of metallographers and young scientists: collection of research papers]. Ekaterinburg: USTU-UIP, 2007, pp. 235–237.
  73. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Survey on compositions of heat- and wear-resistant complex alloyed white cast irons. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2009, no. 8, pp. 31–34.
  74. Kolokoltsev V.M., Voronkov B.V., Goltsov A.S., Molochkova O.S. et al. Increasing a life time of heat- and wear-resistant cast iron parts. *A caster of Russia*, 2009, no. 6, pp. 9–12.
  75. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Development of advanced materials for manufacturing of heat- and wear-resistant cast parts. *Materialy XVII mezhdunarodnogo simpoziuma "Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktssii i sploshnykh sred" im. G.A. Gorshkova* [Papers of the 17<sup>th</sup> Gorshkov international symposium "Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continua"]. Yaropolets, 2011, pp. 147–149.
  76. Kolokoltsev V.M., Goltsov A.S. Synthesis and introduction of new heat- and wear-resistant cast irons to cast parts of a special application. *Sovremennaya metallurgiya nachala novogo tysyacheletiya* [Modern metallurgy in the beginning of a new millennium: collection of reports of the 4<sup>th</sup> international scientific and technical conference]. Part 1. Lipetsk: LSTU, 2007, pp. 85–89.
  77. Kolokoltsev V.M., Goltsov A.S., Bryalin M.F. An increase in service properties of castings from heat- and wear-resistant chromium-manganese cast irons. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007, no. 4 (20), pp. 22–25.
  78. Petrochenko E.V., Mironov O.A., Molochkova O.S. Study of the effect of carbide phase parameters on mechanical and special properties of complex alloyed white cast irons. *Materialovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Materials science and metal heat treatment: international collection of research papers]. Ed. by Emelyushin A.N. and Petrochenko E.V. Magnitogorsk: MSTU, 2009, pp. 238–242.
  79. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Increasing properties of heat- and wear-resistant cast irons by additional alloying with niobium. *XXI Uralskaya shkola metallovedov-termistov "Aktualnye problemy fizicheskogo metallovedeniya staley i splavov"* [The 21<sup>st</sup> Ural school of metallographers and heat treaters "Current problems of material physics of steels and alloys": collection of research papers]. Magnitogorsk: MSTU, 2012, pp. 261–262.
  80. Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Analysis of a relation between a chemical composition, cooling conditions during crystallization and structural features of alloys, an oxidized surface and properties of complex alloyed white cast irons. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 4 (36), pp. 50–53.
  81. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Effect of a chemical composition, cooling conditions during crystallization on a structure and properties of heat- and wear-resistant complex alloyed iron-carbon alloys. *Technology of metals*, 2013, no. 1, pp. 10–14.
  82. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Classification of complex alloyed white cast irons by their structural features. *Liteynoe proizvodstvo segodnya i zavtra* [The foundry of today and tomorrow: abstracts of the international scientific and practical conference]. Saint Petersburg, 2006, pp. 75–79.
  83. Kolokoltsev V.M. Nosov Magnitogorsk State Technical University. History. Development. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1(45), pp. 5–6.